

# 火星移動科学探査車に搭載する掘削装置の開発研究（その1）

## Experimental Study of Subsurface Drilling System on a Mars Rover(Part 1)

斎藤 顕次\*  
Kenji Saito

前川 一行\*\*  
Kazuyuki Maekawa

平岡 博明\*\*\*  
Hiroaki Hiraoka

明石 健\*\*\*  
Takeshi Akashi

細川 勝己\*\*\*  
Katsumi Hosokawa

### 要 約

火星移動科学探査車に搭載する地下探査用掘削機の開発実験を行っている。オーガー方式の掘削試験機を作製し、その基本的な掘削・試料採取性能について検討した。現在実験は継続中であり、今回の報告はその第一報である。

その結果、未固結砂地盤において、①オーガーとビットのピッチ長さの比率が2:1のドリルツールでは安定した掘削が可能であるが、オーガーとビットのピッチ長さが等しいドリルツールでは安定掘削が不可能であること、②給進力一定の場合、掘進速度はオーガーの回転数によって制御することが可能であること、③採取試料の拡散を抑制する運転条件は低回転数、低給進力であること、を明らかにすることができた。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 掘削実験機
- §3. 実験用地盤
- §4. ドリルツール交換実験
- §5. 運転設定制御実験
- §6. まとめ

### §1. はじめに

表題の開発研究は、文部省宇宙科学研究所の河島信樹教授らを中心とした火星移動科学探査車研究会の活動の一環として行っているものである。同研究会の活動目的は、近い将来の火星探査計画への国際的な協力要請、あ

るいは国内の大型計画に対して対応できるように、技術的に実現可能な移動探査車（ローバー）と、それを用いた火星探査計画を準備することである。この構想の大きな特色は、火星の地下に存在している可能性がある水分と有機物を、無人移動探査車に搭載した地盤掘削装置によって探査するところにある。火星における水分と有機物の探査は、科学的にも、また宇宙開発の実現性という点でも、重要な意義がある。

研究会の構想に基づき、オーガー方式の掘削実験機を製作した。実験は現在継続中である。実験の目的は、完全自動化のために必要な掘削メカニズムの解明と、掘削に伴って採取される科学分析用の試料の評価を行い、実際の探査に使用可能な掘削機のシステムを開発することである。

本研究は、大きく分けて、次の6つの実験よりなる。

- E 1 基本性能実験
- E 2 未固結地盤実験
- E 3 未固結層状地盤実験
- E 4 固結地盤実験

\*技術研究所地質研究課長  
\*\*技術研究所地質研究課副課長  
\*\*\*技術研究所地質研究課

E 5 凍土実験

E 6 障害物実験

E 1は地盤の条件を一定にして、実験機の初期設定や運転条件を変化させたときの、掘削・試料採取能力評価実験である。E 2は地盤の条件を変化させたときの実験で、E 3はそれらを層状に重ねた地盤についての実験である。E 4とE 5は、現在計画中であるが、それぞれ固結地盤と凍土を想定した地盤について実験を行う予定である。E 6は、掘進コース上に粒径の大きな碎石等の障害物を置いたときの実験である。

本報告は、E 1の基本性能評価実験の結果を、ドリルツールの交換と運転設定制御の2つの点から検討したものである。

§ 2. 掘削実験機

2-1 掘削実験機の製作

一般にボーリングと言えば、コアボーリングを指すことが多く、不攪乱試料の採取、硬質層の掘削が可能であるなどの利点がある。しかし、消費エネルギーが大きくなることや、水などの循環流体が必要であるなどの、惑星探査には致命的な欠点をもつ。そこで、火星探査用の掘削システムをオーガー方式とすることに定め、掘削実験機を作製した。ただし、オーガー方式には、試料が攪乱されることと、硬い層の掘削が困難であるという欠点がある。

2-2 掘削実験機の仕様

掘削実験機を Fig. 1 に、その仕様を Table 1 に示す。

2-3 ドリルツール

ドリルツールとは、掘削機のうち直接地中に貫入する部分を指し、オーガー、ビット、ケーシングよりなる。本実験機ではオーガーとビットの交換が可能である。Fig. 2 に実験で使用したオーガーとビットの組合せを示す。

2-4 掘削機構

本実験機の掘削機構は、ビットが回転することによって地盤を削り、ケーシングがマストに沿って地盤中に貫入していくというものである。削り取られた地盤材試料は、ケーシング内の垂直オーガーによって上方に搬送される。これらのドリルツール部には給進力（荷重）がかけられる。運転に当たって設定できる項目は回転数と給進力の2つである。

Table 1 掘削実験機の仕様

ボーリング方式:二重管式偏心オーガービット無水サンプリング(孔径60mm)

回転装置	ロータリスピード	0~833rpm 無段変速
	ロータリトルク	0.7~7.0kgf・m
	回転モーター出力	0.75kW (4p 50Hz)
給進装置	給進機構	電動機とチェーンの組合せ
	給進力	最大 178kgf
	給進速度	最大 8 m/min
	ストローク長	1500mm
	給進モーター出力	0.4kW (4p 50Hz)
	給進位置検出装置	磁歪形変位センサー
	ビット荷重検出装置	ロードセル
寸法	掘削時本体	全高 2.4m, 全幅 1.4m 全長 1.7m
	重量	本体計算重量 約260kgf

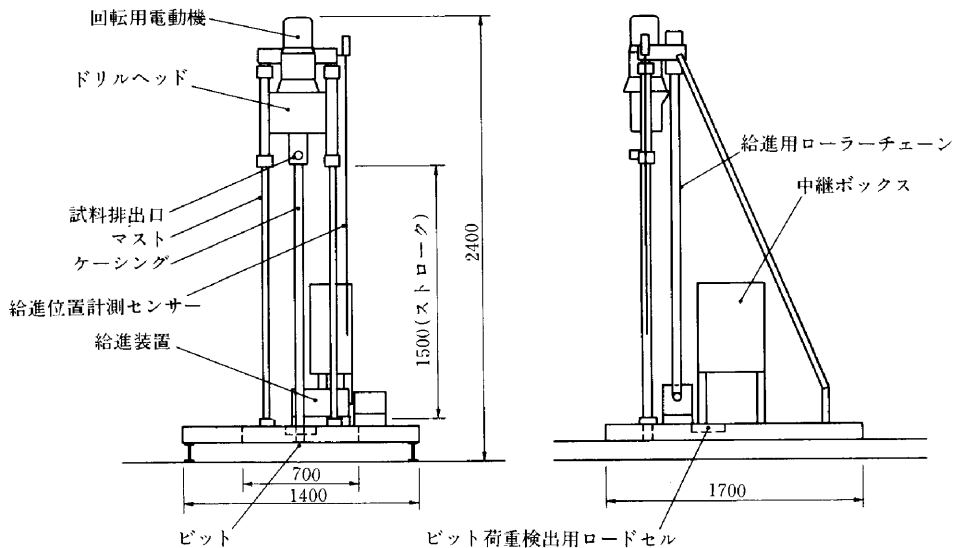


Fig.1 掘削実験機

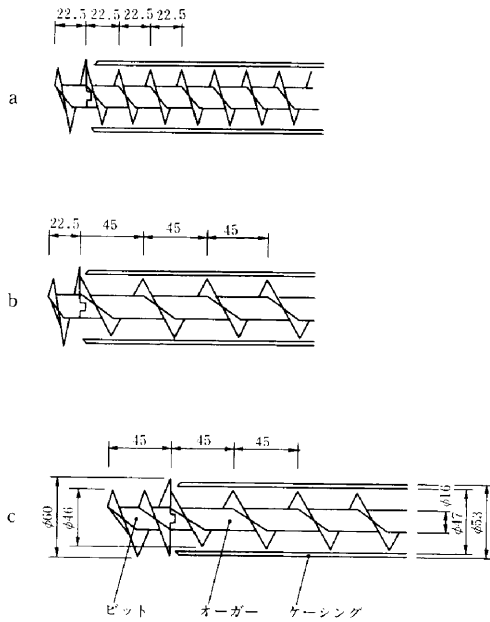


Fig.2 オーガーとビットの組合せ

採取された試料の排出方法は、①正転排出法（掘進中に上部の試料排出口より排出される）と、②逆転排出法（掘進終了後にケーシングを引き上げてオーガーを逆転させることで下方より排出させる）の2通りある。本報告では試料の拡散が少ない逆転排出法についてのみ検討する。

2-5 計測項目

計測項目は、オーガーとビットの回転数、給進力（荷重）、回転用電動機の負荷電流、給進位置である。それぞれ時系列データとして計測した。なお、回転数と給進力は運転前の初期設定値と正確に一致せず、それは特に低回転数、低給進力領域で顕著であった。

§ 3 . 実験用地盤

3-1 地盤材料

地盤材にはスクリーニングスを使用した。粒度分布を Fig. 3 に示す。細礫分5%、粗砂分53%、細砂分33%、シルト分は9%である。平均比重は2.63であった。

3-2 地盤の作成方法

標準的な実験用地盤の構成を Fig. 4 に示した。模擬地盤の作製に当たっては、空気乾燥した地盤材料を土槽内に敷均した後、層厚20cm毎に振動プレートで締固めた。また、オーガーによる掘削試料の拡散の程度をみるために、地盤中に厚さ2cmの着色薄層を設けた。この着色薄層は、地表面から40cmごとに、青、赤、黄、緑の順に色分けした。

3-3 実験用地盤の物性

作成されたそれぞれの地盤について、密度、含水比、強度を測定した。地盤強度の測定はスウェーデン式サウンディングによる。密度は1.79~1.89g/cm<sup>3</sup>で、平均は1.84g/cm<sup>3</sup>であった。含水比は1.0~2.5%、平均は1.8%である。スウェーデン式サウンディングの結果は、深さ30cmでN<sub>sw</sub>=50程度、70cm以深でN<sub>sw</sub>=100~150程度であった。N値に換算すると70cm以深でN=9~12となる。

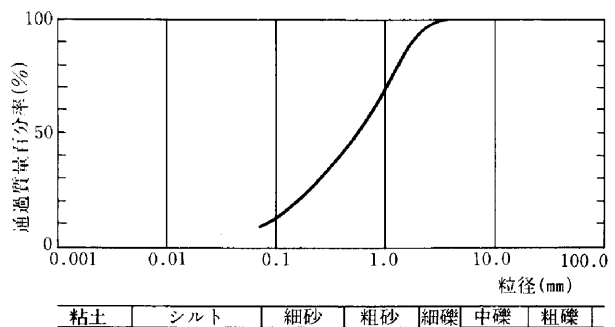
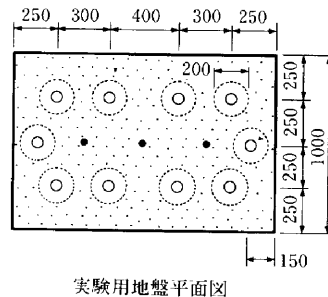
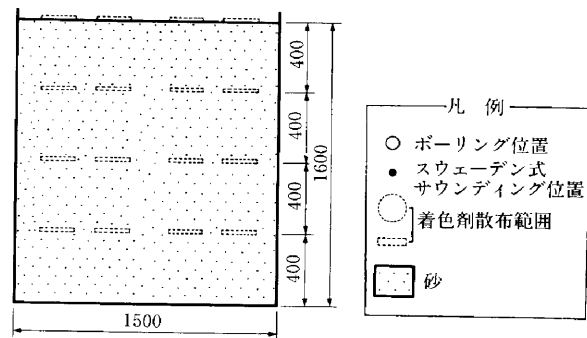


Fig.3 実験用地盤材の粒度分布



実験用地盤平面図



実験用地盤断面図

Fig.4 実験用地盤

### § 4 . ドリルツール交換実験

#### 4-1 実験概要

ドリルツールを交換して、それぞれについて掘削を行ったときの実験結果と解析結果を示す。

#### 4-2 実験条件

##### (1) ドリルツール

オーガーとビットの組合せを a, b, c の3つとした (Fig. 2)。

組合せ a は、オーガーのピッチ比 (オーガーのピッチ長さとスパイラル径との比) が 0.5 で、ビットとオーガーのピッチ長さの比率は 1 : 1 である。ビットは1条のスパイラルになっている。ビットのピッチ比 (ビットのピッチ長さとスパイラル径との比) は 0.5 である。

組合せ b は、オーガーのピッチ比が 1.0 で、ビットとオーガーのピッチ長さの比率は 1 : 2 であり、ビットは1条のスパイラルとなっている。ビットのピッチ比は 0.5 になる。

組合せ c は、オーガーのピッチ比が 1.0 で、ビットとオーガーのピッチ長さの比率は 1 : 1 であるが、ビットは2条のスパイラルとなっている。ビットのピッチ比は 1.0 である。

##### (2) 運転条件

初期の運転設定はそれぞれ、50rpm, 25kgf (245N)、100rpm, 25kgf (245N)、30rpm, 25kgf (245N)、50rpm, 0kgf (0N) の4通りとした。また、掘進目標深度は135cmとした。

#### 4-3 実験結果

a と c の組合せのものについては、すべて掘進目標深度に達する前に掘進が停止してしまった。掘削停止の直

接的原因はオーガー回転の停止である。オーガーの回転電動機負荷電流が急激に増加するときに回転が停止する。掘進停止までの距離は、給進力の小さいものほど長くなる傾向がある。一方、b については、給進力が負になるものを除いて、目標深度までの掘削が可能であった。

#### 4-4 解析

##### (1) 掘進速度

回転数と掘進速度との関係を Fig. 5 に、給進力と掘進速度との関係を Fig. 6 に示す。目標深度まで到達することができなかったものについては、マークを塗りつぶしてある。

Fig. 5 では、a, b, c それぞれの組合せにおいて正の相関がみられ、回転数は掘進速度に影響を与えていることがわかる。特に、組合せ b では強い相関がみられる。掘進速度は回転数によって制御することが可能である。また、同じ回転数でみた場合、a と b は近いところに分布しているが、c は必ずそれらよりも値が大きくなっており、回帰直線の傾きが大きくなっている。組合せ a, b と、組合せ c との違いはビットのピッチ長さにあり、ビットのピッチ長さが大きい c では掘進速度が速くなっている。

一方、給進力と掘進速度の関係 (Fig. 6) については、40kgf (392N) 以下の給進力の場合には、はっきりした傾向を見いだすことはできない。

以上、掘進速度について述べてきたが、これらの解析からは安定的に掘進できる b と、途中で掘進が止まる a, c の違いを説明することはできない。

##### (2) 単位掘進距離当りの採取試料質量

本方式のポーリング装置は、削り取った地盤材料を上方向に搬送することにより掘進するという機構をもつ。そ

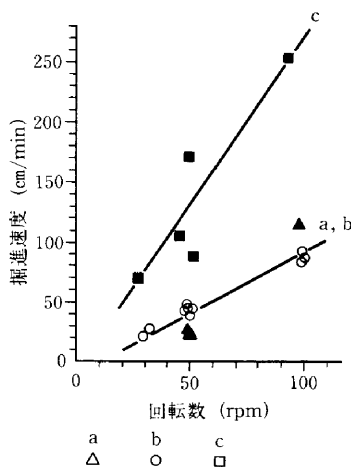


Fig.5 回転数と掘進速度  
(掘進途中で停止したものは  
マークを塗りつぶした)

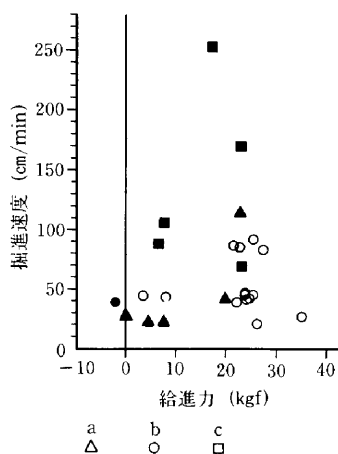


Fig.6 給進力と掘進速度

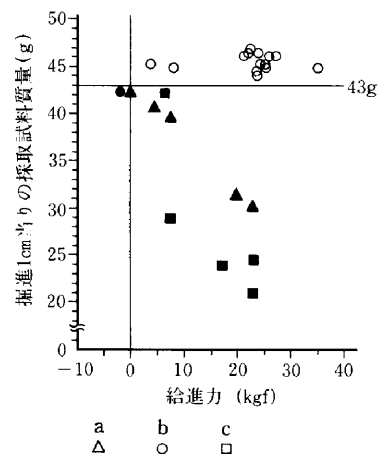


Fig.7 給進力と単位掘進距離当りの  
採取試料質量

ここで、掘進性能を議論するためには、採取される試料に注目する必要がある。

Fig. 7は単位掘進距離当りの採取試料質量と給進力との関係を求めたものである。この図から、目標深度まで掘進できなかったものは、単位掘進距離当りの採取試料質量がおよそ43g/cm以下となっていることがわかる。

組合せbでは、給進力の値が正であればその大きさに関係なく単位掘進距離当りの採取試料質量がほぼ一定値を示し、掘削した試料の取り込みがスムーズに行われていることを示している。しかし、給進力が負のものは単位掘進距離当りの採取試料質量が減少し、安定した掘進が行えなくなる。

組合せa, cについてみると、給進力の大きいものほど単位掘進距離当りの採取試料質量が小さくなる傾向を示している。ビットに荷重を加えれば加えるほど、ケーシング内に掘削した試料が入りにくくなっていることがわかる。これはビットとオーガのピッチ長さの比率に問題があり、試料の掘削と取り込み、搬送にバランスを欠いていることを示すものであると考えられる。

## § 5. 運転設定制御実験

### 5-1 実験概要

ドリルツールを変えずに、運転設定を様々に変化させたときの掘削実験である。

### 5-2 実験条件

#### (1) ドリルツール

ドリルツール交換実験の結果、オーガとビットの組合せは、安定掘削が可能でbを採用した (Fig.2参照)。

#### (2) 運転条件

初期の運転設定は、回転数は20~200rpm、給進力は

12.5(122.5)~175kgf(1715N)の範囲内で段階的に設定した。それぞれのケースの回転数と給進力についてFig. 8に示す。掘削目標深度は135cmとした。

### 5-3 実験結果

実験試錐の多くが目標深度まで掘削することが可能であった。しかし、運転設定が高回転数、高給進力の試錐については、掘削機全体が大きく振動し、安定に掘削できたとは言い難い。

### 5-4 解析

#### (1) 回転電動機負荷電流

オーガの回転電動機負荷電流を Fig. 9に示す。オーガの回転電動機負荷電流は、単にオーガの回転数のみならず、給進力によっても影響を受けており、回転数、給進力が小さくなると負荷電流も小さくなる。

#### (2) 掘進速度

掘進速度について Fig. 10に示す。この図より、回転数、給進力のいずれを制御しても掘進速度が変化することがわかる。また、掘進速度を変化させようとするときには、給進力よりも回転数を制御する方が効率的である。給進力を一定とした場合、回転数と掘進速度はほぼ比例関係にあり (Fig. 11)、回転数は有効な速度制御項目となることがわかる。

#### (3) 採取試料の検討

##### ① 拡散層厚の概念

拡散層厚とは、採取試料の拡散の程度を表すために定義した概念で、掘削によって拡散する着色剤の範囲を掘削地盤の層厚におきかえて表現したものである。拡散層厚の値が小さいものほど、拡散の度合いが低い。

##### ② 試料の拡散

Fig. 12は、深度120cmの着色薄層の掘削 (着色薄層からのケーシング貫通長さは15cm) において、採取試料

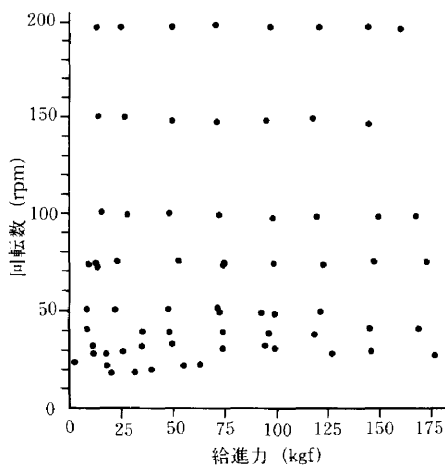


Fig.8 実験ボーリング一覧

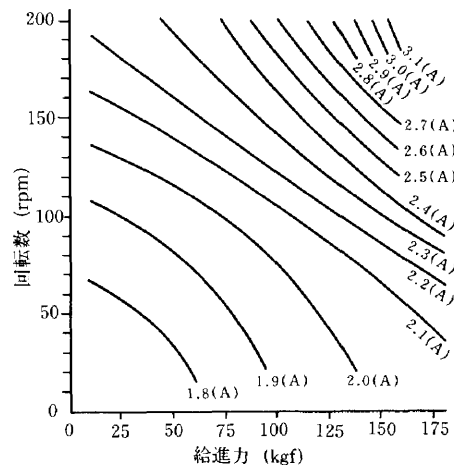


Fig.9 回転電動機負荷電流 (深度80~90cm)

の拡散層厚が20cm以下になる領域と、回転数と給進力との関係を示したものである。低回転数、低給進力のものほど拡散層厚が小さくなる傾向があり、拡散層厚が20cm以下になるときの運転条件はおおよそ50rpm, 75kgf (735N) 以下である。

③運転条件と拡散層厚

オーガの回転電動機負荷電流、掘進速度、拡散層厚と、回転数と給進力との関係を Fig. 13 に示す。拡散層厚が20cm以下になる領域を斜線で示す。試料の拡散を抑えるための運転条件は低回転数、低給進力であり、掘進速度が遅くなるほど、またオーガの回転電動機負荷電流が小さくなるほど試料の拡散が抑えられる。

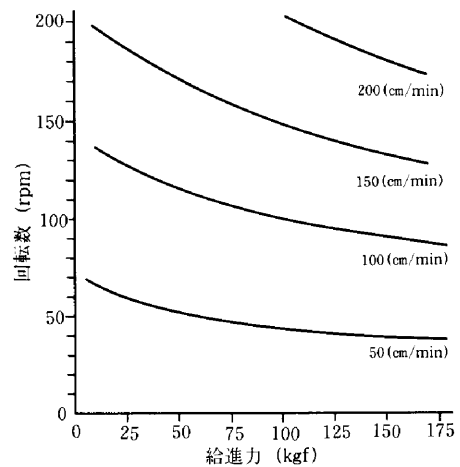


Fig.10 掘進速度

§ 6 . ま と め

以上、まとめると次のようになる

- (1)オーガとビットのピッチが等しいドリルツールでは、運転条件の如何にかかわらず安定した掘削は不可能である。ビットのピッチがオーガのその1/2のものについては、安定に掘削することが可能であり、単位掘進距離当りの採取試料質量はほぼ一定の値をとる。
- (2)掘進速度は、回転数、給進力とビットのピッチ長さに影響を受け、回転数、給進力が大きくなるほど、またビットのピッチ長さが長くなるほど掘進速度が速くなる。給進力一定の場合、掘進速度は回転数によって制御することが可能である。
- (3)採取試料の拡散を抑えるための運転条件は、低回転数、低給進力である。回転数50rpm 以下、給進力75kgf (735N) 以下にした場合、深度120cmの着色薄層を15cm貫通させたときの拡散層厚を20cm以下にすることができ。

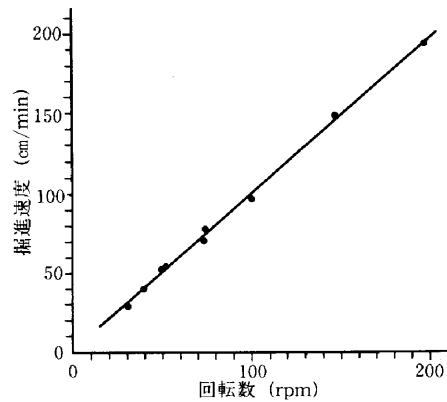


Fig.11 回転数と掘進速度  
(給進力設定75kgf (735N))

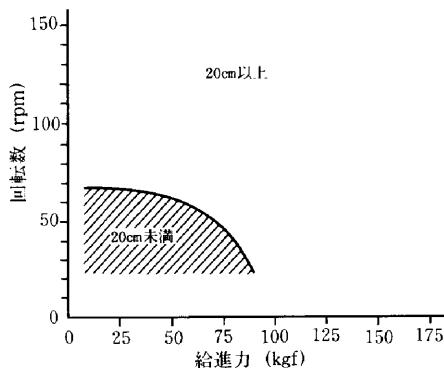


Fig.12 拡散層厚  
(深度120cm試料, 15cm貫通)

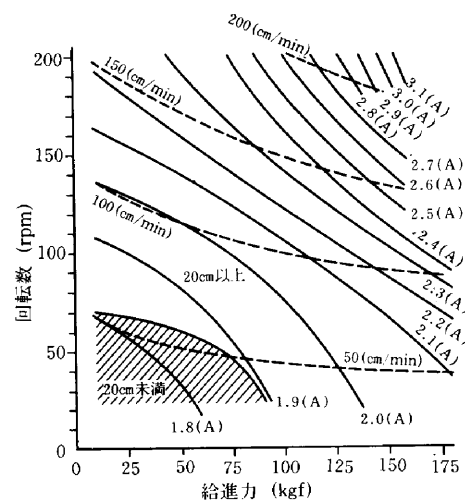


Fig.13 運転制御条件